



①⑨ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Patentschrift**
⑩ **DE 39 33 527 C 2**

⑤① Int. Cl.⁵:
B 66 C 13/06

⑳ Aktenzeichen: P 39 33 527.5-22
㉑ Anmeldetag: 4. 10. 89
㉒ Offenlegungstag: 18. 4. 91
㉓ Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 13. 2. 92

DE 39 33 527 C 2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

㉗ Patentinhaber:
Mannesmann AG, 4000 Düsseldorf, DE

㉘ Vertreter:
Meissner, P., Dipl.-Ing.; Presting, H., Dipl.-Ing.,
Pat.-Anwälte, 1000 Berlin

㉙ Erfinder:
Hochreiter, Josef Michael, Ing., Salzburg, AT

㉚ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:
DE-PS 35 13 007
DE-PS 33 35 402
DE-OS 32 28 302
DD-Z.: Hebezeuge und Fördermittel, 1983, H.7,
S.206-209;

㉛ Verfahren zur Dämpfung von Lastpendelschwingungen

DE 39 33 527 C 2

Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf ein Steuerverfahren zur Dämpfung von Lastpendelschwingungen gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

5 Ein derartiges Verfahren ist aus der deutschen Offenlegungsschrift 32 28 302 A1 bekannt.

Hierbei wird die Sollkraft zur Beschleunigung und zur Bremsung der Laufkatze durch einen Antriebsmotor mit einem damit in Verbindung stehenden Rechner, der nach einem Rechenprogramm zur Lösung der für das aus Laufkatze und Lastkörper gebildete Zweimassenschwingungssystem geltenden Differentialgleichung arbeitet, derart gesteuert, daß die Last am Zielort nicht mehr pendelt. Der Rechner steht dazu eingangsseitig mit
10 einem Pendellängenmeßwertgeber zur Ermittlung des Abstandes des Lastkörpers von der Laufkatze in Verbindung.

Hierbei ist nachteilig, daß dieses bekannte Verfahren zur Ermittlung des Steuerbefehls nicht vom Voraussage-typ ist. Des weiteren findet hierbei keine besondere Berücksichtigung einer vor Beginn der Fahrbewegung anliegenden Vorschwingung der Last statt.

15 Aus der Zeitschrift Hebezeuge und Fördermittel (Berlin, 1983, Heft 7, Seiten 206 — 209) ist ein Verfahren zur Lastpendelwinkeldämpfung bei Laufkränen bekannt. In diesem bekannten Verfahren wird das Pendelverhalten der Last im wesentlichen über den realen Pendelwinkel dargestellt. Die Regelkreisstruktur selbst ist nach dem Prinzip der unterlagerten Regelkreise aufgebaut und berücksichtigt alle realen Meßgrößen wie Pendelwinkel, Seillänge und Weg der Laufkatze. Die Betrachtung und Einbeziehung der ausschließlich realen Größen in diesem Regelverfahren hat den Nachteil, daß nicht in allen Betriebssituationen zeitoptimal geregelt werden kann. Des weiteren ist hierbei von Nachteil, daß eine besondere Berücksichtigung der Vorschwingungen vor
20 Fahrtantritt nicht gegeben wird. Legt man jedoch eine Vorschwingung vor Fahrtantritt zugrunde, so führt dieses bekannte Verfahren dazu, daß diese Vorschwingung nur mit zusätzlichem Zeitaufwand geregelt werden kann, was nachteiligerweise zu einer Erhöhung der Umschlagzeiten im Kranbetrieb führt.

25 Eine Berücksichtigung etwaiger Störungen im Fahrbetrieb sind aus der deutschen Patentschrift 35 13 007 C2 bekannt. Dabei werden die Steuerbefehle nach einem Schätzverfahren, die um den theoretisch errechneten Steuerbefehl gestreut sind, nach einem komplizierten mathematischen Auswahlverfahren ausgewählt.

Bei dem aus dieser genannten Patentschrift bekannten Verfahren zur Steuerung einer Laufkatze bei einer Krananlage läuft das zur Bestimmung der Steuerbefehle eingeleitete Schätzverfahren so ab, daß der zur
30 Steuerung der Laufkatzen geschwindigkeit verwendete Steuerbefehl aus einer Vielzahl von bestimmten, untereinander unterschiedlichen Steuerbefehlen ausgewählt wird, nachdem die Ergebnisse der Steuerung aufgrund dieser bestimmten Steuerbefehle abgeschätzt wurden, falls diese der Laufkatze zugeführt werden. Hierbei wird nach der Ermittlung eines Steuerbefehles, bevor dieser der Laufkatzensteuerung zugeführt wird, nochmals in einem weiteren Verfahrensschritt optimiert und erst dieses Ergebnis als Steuersignal der Laufkatze zugeführt. Das heißt, es wird zuvor berechnet, wie die Laufkatze reagieren würde, wenn man den vorberechneten Steuerbefehl zuführen würde. Nachteilig ist hierbei, daß zusätzliche Zeit aufgewendet werden muß und die Abschätzung des letztendlich ausgelösten Steuerbefehles bzw. -signales doch nur das theoretische Verhalten betrachtet und nicht das vorliegende Verhalten in der Praxis berücksichtigt. Nachteilig ist desweiteren der entsprechend große Aufwand zur Durchführung des Steuerverfahrens.

40 Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, das Verfahren der eingangs beschriebenen Art derart weiterzubilden, daß unter Zuhilfenahme eines beliebigen strategischen Pendeldämpfungsverfahrens, welches aus Fahrbewegungen entstehende Lastpendelschwingungen dämpft, zusätzlich auch die Vorschwingungen während des Fahrprozesses mitzudämpfen, so daß kein zusätzlicher Zeitaufwand entsteht.

Die Lösung dieser Aufgabe ergibt sich anhand der kennzeichnenden Merkmale des Patentanspruchs 1.
45 Vorteilhafte Ausgestaltungen dieser Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche 2 und 3.

Die mit der Erfindung erzielten Vorteile liegen darin, daß unabhängig von der Art und Größe der Vorschwingungen minimale Fahrzeiten bzw. Verladezeiten, insbesondere bei Verwendung in Automatikkränen, erreicht werden.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt. Es zeigt

50 Fig. 1 Blockschaltbild: Gesamtübersicht.

Fig. 2 Blockschaltbild: Lagekorrektursollwertbestimmung.

Fig. 1 zeigt ein Blockschaltbild des Ausführungsbeispiels, mit der Anordnung und Verknüpfung einzelner Reglerkomponenten, die nach dem Verfahren arbeiten und verknüpft sind.

Als Eingangsgröße dient der Lagesollwert $x(t)$, der am Ausgang einer strategischen Pendeldämpfungseinrichtung 1 anliegt. Dieser Lagesollwert $x(t)$ wird zum einen an einen Lageregler 2 und zum anderen an eine Einheit 3 zur Erfassung des Lagesollwertes $x(t)$ geführt. Der Lageregler 2 errechnet aus dem Lagesollwert $x(t)$ und einer Rückkopplung mit einem Lagekorrektursollwert $z(t)$ die Sollgeschwindigkeit. Dieser Geschwindigkeitssollwert $V_s(t)$ wird einem Geschwindigkeitsregler 4 zugeführt, der Teil eines Antriebsreglers 5 der Fahrmotoren ist.

Der erhaltene Geschwindigkeits-Istwert $V_I(t)$ wird zum einen einer Recheneinheit 6 und zum anderen einer
60 Pendeleinheit 7 zugeführt, wobei 6 und 7 das Fahrzeug (Katze bzw. Kranbrücke) mit der am Seil hängenden Last repräsentieren. Die Pendeleinheit 7 liefert aus diesem Geschwindigkeits-Istwert $V_I(t)$ den realen Pendelwinkel $\alpha(t)$. Die Recheneinheit 6 liefert durch die Fahrbewegung (= Integration des Geschwindigkeits-Istwertes $V_I(t)$ über die Zeit) den Wert der real gefahrenen Strecke $y(t)$. Dieser Wert $y(t)$ wird einem Summationspunkt a zugeführt, an dem auch in der Rückkopplung mit dem Lageregler 2 der Wert des Lagekorrektursollwertes $z(t)$ anliegt. An diesem Summationspunkt a entsteht die Differenz der beiden Werte $y(t) - z(t)$. Dieser Wert wird
65 einer Einheit 3 zur Erfassung des entsprechenden Wertes zugeführt. In einem weiteren Schritt wird nun die Pendellänge L gemessen und ebenfalls in dieser Einheit 3 erfaßt. Die erfaßten Werte $\alpha(t)$, $y(t) - z(t)$, L und $x(t)$ werden einer elektronischen Einrichtung 8 zur Bestimmung des Lagekorrektursollwertes $z(t)$ zugeführt. Der

daraus ermittelte Lagekorrektursollwert $z(t)$ wird durch Zuführen zum Lageregler 2 dem Lagesollwert $x(t)$ überlagert.

Das Prinzip der elektronischen Einheit zur Ermittlung des Lagekorrektursollwertes ist in dem Blockschaltbild der Fig. 2 dargestellt.

Der Pendelwinkel $\alpha(t)$ wird einem Multiplikator 10 zugeführt, der über einen Synchronisierimpuls $I \cdot \Delta t$ ein Zeitfenster setzt und die Echtzeitsimulation des Pendelwinkels $\alpha(t)$ einleitet. Dieser Anfangswert wird zum einen über ein Differenzierglied 13 auf einen ersten Integrator 14 und zum anderen parallel dazu direkt auf einen zweiten Integrator 15 geführt. Die Eingangsgröße $y(t) - z(t)$ wird einem zweifachen Differenzierglied 19 zugeführt. Das Ausgangssignal steht in Verbindung mit einem Divisionsglied 21, dem die Pendellänge L zugeführt wird. Das daraus erhaltene Signal liegt am Ausgang, d. h. am Summationspunkt b an, der mit Integrator 14 in Verbindung steht. Die Eingangsgröße Lagesollwert $x(t)$ wird einem zweifachen Differenzierglied 20 zugeführt, dessen Ausgang mit einem Divisionsglied 22 in Verbindung steht, welchem ebenfalls die Pendellänge L zugeführt wird. Der Ausgang des Divisionsgliedes liegt über dem Summationspunkt c am Eingang des Integrators 17. Die Eingangsgröße Pendellänge L wird einem Rechner 23 zugeführt, der den Wert der Dämpfungsvarianzfunktion $\mathfrak{V}(\omega, t)$ und den Wert der Kreisfrequenz ω^2 zusammen jeweils mit dem Wert der Pendellänge L selbst am Ausgang herausgibt. Die Dämpfungsvarianzfunktion wird einem Multiplikator 11 zugeführt, und die Kreisfrequenz ω^2 wird über Multiplikatoren 12, 12' den beiden Echtzeitsimulationen des realen und des strategischen Pendelwinkels zugeführt.

In beiden Integrationsgliedern 14, 15 und 17, 18 entsteht am Ausgang das jeweilige Echtzeitmodell. Beide Ausgangssignale ϕ, ψ kommen am Summationspunkt d zusammen. Die dort erhaltene Größe, d. h. die Differenz aus $\phi(t)$ und $\psi(t)$ ergibt den Vorschwingungsanteil $\varepsilon(t)$. Die nachfolgende Multiplikation mit der Dämpfungsvarianzfunktion $\mathfrak{V}(\omega, t)$ und der Pendellänge L wird einem Integrator 16 zugeführt, der dann als Ausgangsgröße den Lagekorrektursollwert $z(t)$ liefert.

Die beiden Echtzeitmodelle ϕ, ψ arbeiten nach den Differentialgleichungen der entsprechenden Pendelsysteme. Als erstes wird der reale Pendelwinkel $\alpha(t)$ durch die Synchronisation mit einem Echtzeitmodell gekoppelt und durch dasselbe simuliert. Dies hat zur Folge, daß sämtliche aus einer statischen Verformung des Tragwerkes entstehenden Störeinflüsse eliminiert werden. Diese Kopplung muß mathematisch die Funktion $\alpha(t)$ stetig in die Funktion $\phi(t)$ überführen. Dasselbe gilt für die Ableitungen der entsprechenden Funktionen.

Im weiteren existieren dann prinzipiell drei strukturgleiche Schwingungssysteme:

[ϕ]: Das reale Lastpendelsystem besteht aus einem Echtzeitmodell, das die Pendelschwingung inklusive der Vorschwingung simuliert.

[ψ]: Das strategische Pendelsystem besteht aus einem Echtzeitmodell, dessen Pendelausschlag ψ jenen vom α , jedoch ohne Vorschwingung nachbildet.

[ε]: Existiert nur theoretisch, entsteht durch die Subtraktion

$$[\phi] - [\psi] = [\varepsilon]$$

und repräsentiert den in ϕ steckenden Vorschwingungsanteil ε .

Die Systeme gehorchen den folgenden Differentialgleichungen:

$$\frac{d^2 \phi}{dt^2} + \omega^2 \phi = \frac{1}{L} \frac{d^2 y}{dt^2} \quad \text{mit } y = \text{Lage-Istwert} \quad (\text{Gl. 1})$$

und $(\phi(t=0), \dot{\phi}(t=0) \neq 0)$

$$\frac{d^2 \psi}{dt^2} + \omega^2 \psi = \frac{1}{L} \frac{d^2 x}{dt^2} \quad \text{mit } x = \text{Lage-Sollwert} \quad (\text{Gl. 2})$$

In Laplace-Transformation lauten die Gleichungen:

$$s^2 \phi(s) + \omega^2 \phi(s) = \frac{1}{L} L(\ddot{y}) + s\phi(0) + \dot{\phi}(0) \quad \text{mit } \ddot{y} = \frac{d^2 y}{dt^2} \quad \text{und } \dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt}$$

$$s^2 \psi(s) + \omega^2 \psi(s) = \frac{1}{L} L(\ddot{x}) \quad \text{mit } \ddot{x} = \frac{d^2 x}{dt^2}$$

Als Voraussetzungen zur mathematischen Lösbarkeit des gedachten Systemes [ε]: wird angenommen, daß es sich insgesamt um einen idealen Regler handelt. Das bedeutet, daß die Sollwerte als Istwerte auch erreicht werden.

Der Vorschwingungsanteil ε ergibt sich dann aus folgender Differenz:

$$[\varphi]: -[\psi]: = [\varepsilon]:$$

$$\Rightarrow [\varepsilon]: \quad s^2 \varepsilon(s) + \omega^2 \varepsilon(s) = \frac{1}{L} L((\ddot{y} - \ddot{x}) = 0)$$

$$+ s(\varphi(0) = \varepsilon(0)) + (\dot{\varphi}(0) - \dot{\varepsilon}(0))$$

bzw. im Zeitbereich

$$\text{mit } (\varphi(0); \dot{\varphi}(0)) \neq 0$$

$$\ddot{\varepsilon} + \omega^2 \varepsilon = 0 \quad (\text{Gl. 3})$$

$$\text{und } \dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}; \quad \ddot{\varepsilon} = \frac{d^2\varepsilon}{dt^2}$$

Die Differentialgleichungen 1, 2, 3 sind strukturgleich und beschreiben ungedämpfte harmonische Schwingungsvorgänge. Der Aufgabenstellung entsprechend soll der in α bzw. φ steckende Vorschwingungsanteil ε durch Dämpfung zum Verschwinden gebracht werden. Zu diesem Zweck wird in die Differentialgleichung 3 ein Term erster Ordnung $\delta \cdot \dot{\varepsilon}$ eingeführt.

$$\ddot{\varepsilon} + \delta \dot{\varepsilon} + \omega^2 \varepsilon = 0 \quad (\text{Gl. 4})$$

bzw.

$$s^2 \varepsilon(s) + \delta s \varepsilon(s) + \omega^2 \varepsilon(s) = \frac{1}{L} \alpha (\ddot{y} - \ddot{x}) + (s + \delta) \varphi(0) - \dot{\varphi}(0) \quad (\text{Gl. 4a})$$

Aus der Beziehung $[\varepsilon]: + [\psi]: = [\varphi]$ erhält man die Differentialgleichung für φ , mit gedämpftem Vorschwingungsanteil ε .

$$\ddot{\varphi} + \omega^2 \varphi = \frac{1}{L} (\ddot{y} - L \delta \dot{\varepsilon}) \quad (\varphi(0); \dot{\varphi}(0)) \neq 0 \quad (\text{Gl. 5})$$

Die Differentialgleichung ist durch zweimalige Integration in den Ortsraum zu überführen.

$$\int \int (\ddot{y} - L \delta \dot{\varepsilon}) dt dt = y(t) - L \int \delta \varepsilon(t) dt \\ = x(t) - L \int \delta \varepsilon(t) dt \quad (\text{Gl. 6})$$

Die Aufgabe der Erfindung, das Lageziel auch bei zu dämpfender Vorschwingung ohne Zeitverzug zu erreichen, führt zu folgender Bedingung:

$$\int \delta \varepsilon(t) dt \rightarrow 0 \quad (\text{Gl. 7})$$

Die Erfüllung dieser Forderung hängt vom zeitlichen Verlauf der Dämpfungsvarianzfunktion $\delta \cdot \varepsilon(t)$ ab. Dazu wird das charakteristische Polynom $P(s)$ aus der Gleichung 4a betrachtet.

$$P(s) = s^2 + \delta s + \omega^2 = 0 \quad (\text{Gl. 8})$$

Die beiden Wurzeln lauten:

$$s_{1,2} = -\frac{\delta}{2} \pm \sqrt{\frac{\delta^2}{4} - \omega^2} \quad (\text{Gl. 9})$$

Für die gedämpfte harmonische Schwingung gilt dann:

$$s_{1,2} = -\frac{\delta}{2} \pm i \sqrt{\text{abs}\left(\frac{\delta^2}{4} - \omega^2\right)}$$

Mit Einführung der Dämpfungsparameter $(\beta, \gamma) < 1$ läßt sich diese Gleichung nun darstellen:

$$s_{1,2} = -\beta \omega \pm i \sqrt{\omega^2 - \beta^2 \omega^2}$$

$$= \omega (-\beta \pm i \sqrt{1 - \beta^2})$$

$$= \omega (-\beta \pm i \gamma) \text{ mit } \beta^2 + \gamma^2 = 1$$

Hierbei ergibt aus 5 sich folgende Lösung:

$$\epsilon(t) = \exp(-\beta\omega t) \cdot [\varphi(0)(\cos \gamma\omega t + \frac{\beta}{\gamma} \sin \gamma\omega t) + \dot{\varphi}(0)\sin \gamma\omega t]$$

5

Die obige, in Gleichung 7 angegebene Forderung ist dann erfüllbar, wenn die Dämpfungsvarianzfunktion 9 zeitvariant bleibt.

$$9 \rightarrow \mathcal{Q}(\omega, t) \text{ bzw. } \mathcal{Q}(\omega, t) = 2\omega\beta(\omega, t)$$

10

Damit folge für den Lagekorrektursollwert $z(t)$:

$$z(t) = 2L\omega \int \beta(\omega, t)\epsilon(t)dt \rightarrow 0 \text{ am Lageziel}$$

15

Es ist nun der zeitliche Verlauf von $\beta(\omega, t)$ so zu bestimmen, daß der Lagekorrektursollwert gegen Null geht. Dies ist in mathematisch geschlossener Form und demzufolge auch elektronisch praktisch nicht möglich. Die Bestimmung dieser Dämpfungsfunktion erfolgt deshalb durch Tests an der realen Anlage.

Selbstverständlich ist es möglich, den Teil der Erfindung, der die Bestimmung des Lagekorrektursollwertes $z(t)$ vornimmt, durch ein Computerprogramm zu ersetzen.

20

Positionsliste

Signale, Meß- und Regelgrößen

25

$x(t)$ = Lagesollwert

$z(t)$ = Lagekorrektursollwert

$V_s(t)$ = Geschwindigkeits-Sollwert

$V(t)$ = Geschwindigkeits-Istwert

$Y(t)$ = real gefahrene Strecke, Lage-Istwert

30

L = Pendellänge

ω = Pendel-Kreisfrequenz

Fig. 1, Gesamtübersicht (Blockschaltbild)

35

1 = strategische Pendeldämpfungseinrichtung

2 = Lageregler

3 = Erfassungseinheit

4 = Geschwindigkeitsregler

5 = Antriebsregler

40

6 = Recheneinheit

7 = Pendeleinheit

8 = elektronische Einrichtung zur Bestimmung von $z(t)$

a = Summationspunkt

45

Fig. 2, Lagekorrektursollwertbestimmung

10—12, 12' = Multiplikatoren

$I \cdot \Delta t$ = Synchronisierimpuls

13 = Differenzierglied

50

14—18 = Integratoren

19—20 = zweifach Differenzierglieder

21, 22 = Divisionsglieder

23 = Rechner

b, c, d = Summationspunkte

55

Patentansprüche

1. Steuerverfahren zur Dämpfung von Lastpendelschwingungen aus Fahrbewegungen bei Krananlagen mit Laufkatze, wobei die Fahrbewegungen über die Ermittlung von Zustandsgrößen des Systems Kran-Last und die Berechnung von Sollwerten so gesteuert werden, daß eine am Kran herabhängende Last am Zielort nicht mehr pendelt, **dadurch gekennzeichnet**, daß auch nicht aus der Fahrbewegung entstehende Vorschwingungen während des Fahrprozesses mitgedämpft werden, indem zu einem Lagesollwert $x(t)$ ein entsprechender Lagekorrektursollwert $z(t)$ ermittelt und dem Lagesollwert $x(t)$ überlagert wird, wobei in folgenden Verfahrensschritten gesteuert wird:

60

a) Ermittlung des strategischen Lagesollwertes $x(t)$ und Erfassung eines realen Pendelwinkels $\alpha(t)$ sowie der Seillänge L ,

65

b) Darstellung des realen Pendelwinkels $\alpha(t)$ durch einen aus einem ersten Echtzeitmodell simulierten

und mit $(\alpha(t))$ zeitlich synchronisierten Pendelwinkel $(\varphi(t))$,

c) Darstellung bzw. laufende Berechnung eines nur aus der Fahrbewegung resultierenden strategischen Pendelwinkels $(\psi(t))$ durch ein zweites Echtzeitmodell.

d) Bildung der Differenz $(\varepsilon(t)) = (\varphi(t)) - (\psi(t))$, wobei $(\varepsilon(t))$ der im realen Pendelwinkel $(\alpha(t))$ bzw. $(\varphi(t))$ enthaltene Vorschwingungsanteil ist,

e) Bestimmung eines von $(\varepsilon(t))$ abhängigen Lagekorrektursollwertes $(z(t))$ aus $(x(t))$, $(y(t))$, $(\varphi(t))$, $(\psi(t))$ und (L) unter Zuhilfenahme einer ermittelten, der jeweiligen Pendelsituation angepaßten Dämpfungsvarianzfunktion $(\mathcal{G}(\omega, t))$,

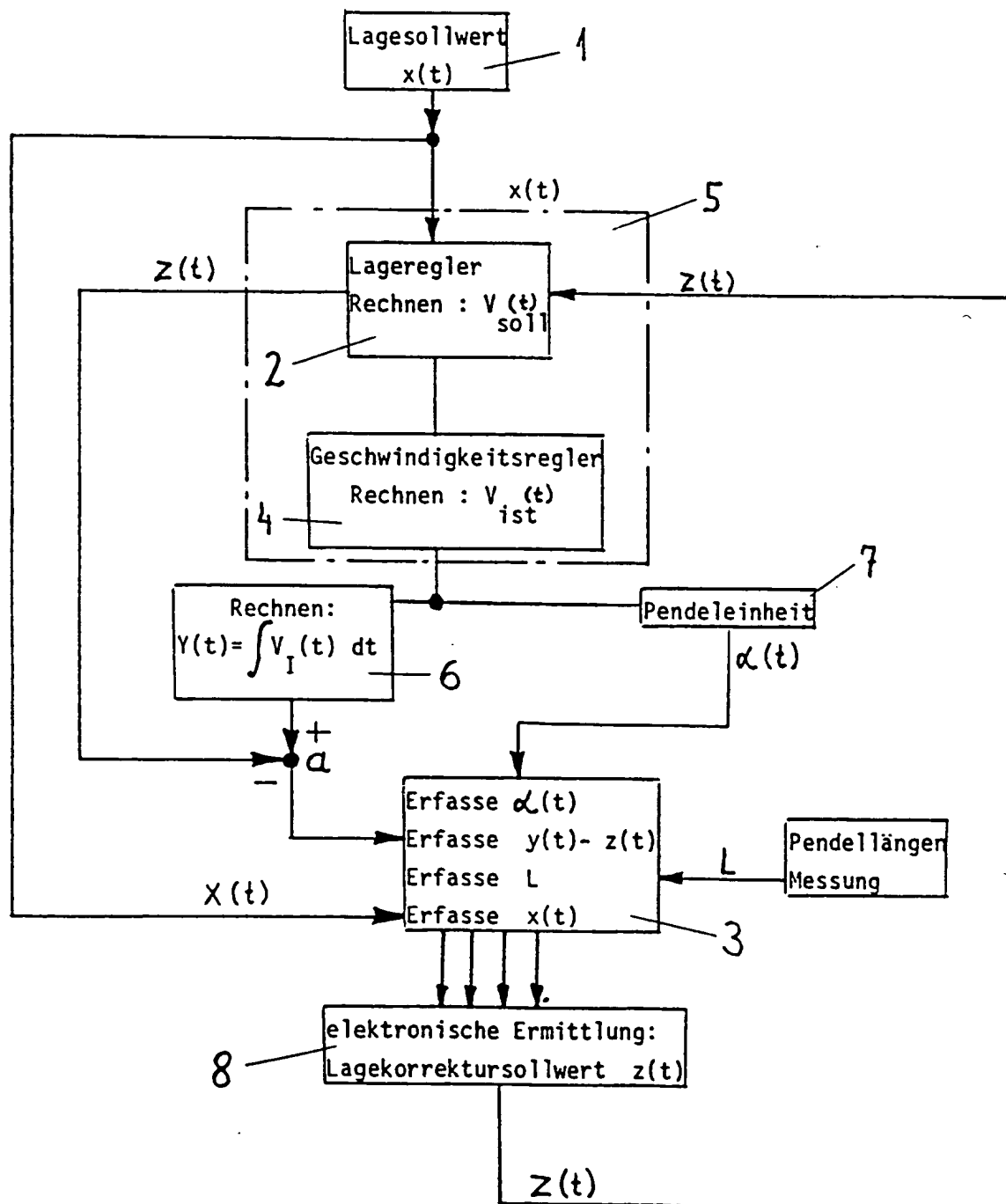
f) Überlagerung des Lagesollwertes $(x(t))$ mit dem Lagekorrektursollwert $(z(t))$ am Eingang des Lageeglers (2) und Weitergabe der daraus resultierenden Ausgangsgröße $(v(t))$ als Sollwert an den Geschwindigkeitsregler (4).

2. Steuerverfahren zur Dämpfung von Lastpendelschwingungen nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Echtzeitmodell $(\varphi(t))$, vor oder am Beginn der Fahrbewegung durch einen Synchronisationsimpuls $(I \cdot \Delta t)$ eine kurzzeitige Kopplung mit der ermittelten realen Vorschwingung $(\alpha(t))$ erfährt und mit derselben zeitlich synchronisiert wird.

3. Steuerverfahren zur Dämpfung von Lastpendelschwingungen nach den Ansprüchen 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Dämpfungsvarianzfunktion $(\mathcal{G}(\omega, t))$ einen Verlauf aufweist, der die Pendelwinkeldifferenz $(\varepsilon(t))$ sowie den Lagekorrektursollwert $(z(t))$ am Ende des Fahrvorganges praktisch zu Null macht.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

Figur 1



Figur 2